УДК 614.8
В.С. Гуць, д.т.н., проф.
Національний університет харчових технологій
Н.В. Володченкова
Національний університет харчових технологій

БЕЗПЕКА ЕКСПЛУАТАЦІЇ ПОСУДИН, ЩО ПРАЦЮЮТЬ ПІД ТИСКОМ
HEALTH SAFETY AND OPERATIONS WITH HIGH PRESSURE VESSELS

Наведено причини руйнування посудин, що працюють під тиском та способи попередження цього явища. Розроблено методику розрахунку запобіжного клапана і мембрани при різних режимах зміни тиску.

***Ключові слова**: посудини, що працюють під тиском, вибухи на виробництві, руйнування посудин, запобіжні клапани, запобіжні мембрани, захист від руйнування.*

Приведены причины разрушения сосудов, которые работают под давлением и способы предупреждения этого явления. Разработана методика расчета предохранительного клапана и мембраны при разных режимах изменения давления.

***Ключевые слова:** сосуды, которые работают под давлением, взрывы на производстве, разрушения сосудов, предохранительные клапаны, предохранительные мембраны, защита, от разрушения.*

Reasons of destruction of vessels which work force-feed and methods of warning of this phenomenon are resulted. The method of calculation of safety-valve and membrane is developed at the different modes of change of pressure.

***Keywords:** vessels which work force-feed, explosions on a production, destructions of vessels, safety-valves, preventive membranes, defence, from destruction.*

У промисловому виробництві та побуті широко експлуатуються апарати, посудини та комунікації, що працюють під тиском. Використання посудин, що працюють під тиском, з погляду їхньої безпечної експлуатації, вимагає інженерного рішення комплексу заходів охорони праці

_____

© В.С. Гуць, Н.В. Володченкова, 2010

Аналітичні дослідження показали, що в сучасній технічній літературі не розглядаються математичні моделі на базі рівнянь другого порядку, які дають можливість визначити швидкість реагування запобіжного пристрою при зміні тиску в посудині та інженерні розрахунки режимів реагування захисних пристроїв посудин, що працюють під тиском.

Метою проведеної роботи є розробка методу інженерного розрахунку запобіжних пристроїв: мембран та клапанів, використовуючи сучасні комп'ютерні технології у розв'язанні диференціальних рівнянь другого порядку.

Конструкція посудин повинна бути надійною; забезпечувати безпеку при експлуатації і передбачати можливість огляду, очищення, промивання, і ремонту.

Тому застосування посудин і апаратів, що працюють під тиском, висуває на перший план задачу створення здорових і безпечних умов праці з одночасним рішенням питань профілактики виробничого травматизму. У ряді випадків розгерметизація посудин не тільки небажана з технічної точки зору, але і небезпечна для обслуговуючого персоналу і виробництва в цілому. Тому метою роботи є визначення можливості забезпечення безпечних умов праці, що може бути досягнуто шляхом дослідження конструкцій захисних пристроїв, встановлення їх характеристик при різних умовах навантаження.

При розгерметизації посудин, що працюють під тиском, з'являється небезпека фізичного або хімічного вибуху. При атмосферному тиску вода кипить при 100°С в відкритій посудині. У закритій посудині, наприклад, у паровому котлі, вона закипає при 100°С, але пара, що утвориться при цьому, тисне на поверхню води і кипіння припиняється.

Підраховано, що енергія, яка утримується в 60 кг перегрітої води, яка знаходиться в котлі під тиском $5\cdot 10^5$ Па, еквівалентна енергії вибуху 1 кг пороху. Теплової енергії води в циліндричному котлі, нагрітої до температури близько 170° С цілком достатньо, щоб підкинути його на висоту декілька метрів або вибухнути.

Причинами порушення цілісності стінок котла, що призводить до механічного руйнування і вибуху є такі:

1) надмірне перевищення розрахункового (критичного) тиску, що збільшує навантаження на конструкції. Це може відбутися при псуванні запобіжних пристроїв;

2) зниження рівня води в системі до критичного, коли стінки перестають охолоджуватись водою і перегріваються Має місце при пошкоджені засобів автоматичного контролю водопостачання.

3) недоліки конструкції і неякісне виготовлення, наприклад, невідповідність матеріалу, дефекти зварювання або з'єднання елементів;

4) понад регламентований термін експлуатації і ослаблення конструкції в результаті корозії;

5) порушення технічних вимог експлуатації і низька кваліфікація обслуговуючого персоналу.

На водогрійні котли поширюються ті ж вимоги безпеки, що і на парові.

На підприємствах харчових промисловості використовують також повітряні компресори. Вони теж становлять небезпеку у відношенні вибуху. Вибух може відбутися внаслідок можливого утворення вибухонебезпечних сумішей із продуктів розкладання мастил і кисню повітря. Розкладання мастил відбувається під впливом високих температур, що утворюються при стисканні повітря або іншого газу без охолодження компресора.

При експлуатації повітряних поршневих компресорів і повітрозбірників можливі вибухи по причинам: перегрівання стінок компресорів; загоряння і вибух парів, мастил; перевищення тиску, що допускається; засмоктуванням забрудненого пилом або пальними газами повітря; несправністю приладів безпеки.

У харчовому виробництві вибухонебезпечними є також автоклави. Працюють ці посудини в основному під тиском пари і призначені для реалізації різних технологічних процесів, швидкого приготування їжі, консервуванні, стерилізації, що протікають у різних середовищах із широким діапазоном робочих параметрів.

Використовують різні конструкції автоклавів. У деяких конструкції автоклавів з швидкоз'ємними кришками не передбачені необхідні заходи для забезпечення безпеки обслуговування. Робітники з різних причин (несправність контрольно-вимірювальних приладів, запірних пристроїв, пропускної або дренажної ліній, неуважністі і непрофесійності дій персоналу) порушуючи виробничої інструкції відкривають кришку при наявності тиску або випускають пару з автоклава при незакритій або незакріпленій кришці. Це приводить до її відриву та аваріям з важкими наслідками травмування обслуговуючого персоналу.

Також одним із видів посудин, що працюють під тиском є експлуатація балонів з побутовим газом, киснем, ацетиленом для газового різання і зварювання.

Вибухи балонів у всіх випадках становлять небезпеку незалежно від того, який газ у них знаходиться. Причинами вибухів можуть бути удари (падіння), підвищення температур від нагрівання сонячними променями або опалювальними приладами, переповнення балонів зрідженими газами. Вибухи кисневих балонів відбуваються при потраплянні мастильних матеріалів і інших жирових речовин у внутрішню частину вентиля і балона, а також при нагромадженні в них іржі (окалини). У зв'язку з цим кисневі балони перед їхнім наповненням промивають розчинниками (дихлоретаном, трихлоретаном).

Вибухи балонів можуть відбуватися і при помилковому заповненні балонів іншим не призначеним для нього газом, наприклад, кисневого балона пальним газом. Тому введено чітке маркування, при якому всі балони фарбують у різні кольори, і роблять напис. Так, наприклад, кисневі балони фарбують блакитною фарбою, а напис «Кисень» пишуть чорною фарбою. Ацетиленові балони фарбують білою фарбою, а напис пишуть червоною і. т. п.

Основними причинами аварій стаціонарних ємностей (водонапірні башти, ресивери та інші системи), що знаходяться під тиском, є неправильне їх виготовлення, порушення технологічного режиму і правил експлуатації, несправність арматури і приладів, корозійне руйнування та різні види ушкоджень.

Вибухи супроводжуються руйнуванням будівельних конструкцій, устаткування, кріплення і можуть бути безпосередньо причиною виробничих травм у виді опіків, ушкоджень вибуховою хвилею, осколками корпусів, що руйнуються і т.п. У більшості випадків вибухи призводять до важких наслідків.

Безпека роботи посудин під тиском досягається правильним розрахунком корпусів на статичні і динамічні навантаження, застосуванням доброякісних матеріалів для їхнього виготовлення, правильною обробкою матеріалів і належним конструктивним оформленням посудин і, нарешті, створенням нормальних умов експлуатації.

Аналітичні дослідження причин вибухів парових котлів, повітрозбірників, компресорних установок, автоклавів і балонів показує, що значна їх частина відбулася через перевищення розрахункових тисків, що допускаються та відмови

захисних пристроїв насамперед запобіжних клапанів. Виходячи з цього у роботі вирішувалися питання побудови моделі, яка дозволяє зробити розрахунок інерційності запобіжних пристроїв.

Випускний перетин запобіжних клапанів підбирають з розрахунку можливого випуску всієї надлишкової пари або газу. Пропускну спроможність знаходять з рівняння:

$$Q = \mu Sp\sqrt{\left(\frac{gMk}{RT}\right)\left[\frac{1+k}{2}\right]^{\frac{1+k}{k-1}}}, \qquad (1)$$

де Q —пропускна спроможність (продуктивність клапана), кг/год; μ — коефіцієнт витікання (для круглих отворів μ= 0,85); S — площа перетину клапана, см^2; p — тиск під клапаном, Па; g=9,81 м/с^2; k — відношення теплоємностей C_p / C_v при постійному тиску і постійному об'ємі; M — молекулярна маса парів або газів; R — газова постійна; T — абсолютна температура.

Підставляючи в приведену формулу значення μ, g, R і середню величину для k, одержимо:

$$Q = p \cdot 216S\sqrt{M/T}, \qquad (2)$$

звідси площа перетину клапана, см^2:

$$S = Q/216p\sqrt{M/T} \qquad (3)$$

Ця формула є універсальною для всіх пар і газів. Правила безпеки вимагають установки на кожнім котлі не менш двох запобіжних клапанів однакового розміру.

Запобіжні клапани розділяються: 1) за видом — на важільно-вантажні і пружинні; 2) конструкцією корпуса — на відкриті і закриті; 3) за способом розміщення — на одинарні і здвоєні; 4) за підйомом — на низькопідйомні і повнопідйомні.

Схема найбільш розповсюдженого підйомного клапана показана на рис.1

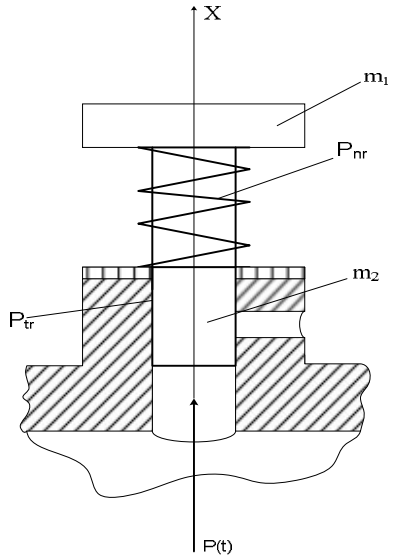

Рис.1 Захисний клапан

Гарантоване підняття пружинного клапана буде забезпечено, коли тиск у посудині досягне граничного.

Принцип роботи захисного клапана наступний. Під дією тиску Q(t) шток рухається, долаючи опір тертя, пружини та вагу (m_1+m_2).Коли кінець штоку досягне розвантажувального отвору, відбудеться скидання тиску. При досягненні його допустимого значення шток повернеться у початковий стан перекривши розвантажувальний опір. Для розрахунку режимів руху клапана запропоноване наступне диференціальне рівняння

$$P_{tr} + P_{nr} + (m_1 + m_2)g = P(t), \tag{4}$$

де P_{tr} - зусилля опору тертя; P_{nr} - зусилля опору пружини; $P(t)$ - зусилля, яке діє на шток.

Перепишемо рівняння (4), врахувавши силу тертя $P_{tr} = K_{tr} + \mu \frac{d}{dt} x(t)$ і силу опору пружини $P_{пг} = cx(t)$. В разі, коли тиск Q(t) у котлі змінюється за лінійним законом, маємо зусилля $P(t) = P_0 + a_1 t$;

$$K_{tr} + \mu \frac{d}{dt} x(t) + cx(t) + (m_1 + m_2)g = P_0 + a_1 t. \tag{5}$$

Розв'язок рівняння (5) у загальному виді [2]

$$x(t) = \frac{1}{c}(P_0 - gm_1 - gm_2 - K_{tr} + a_1 t) - \frac{1}{c^2} a_1 \mu + e^{-\frac{ct}{\mu}} C_1 \tag{6}$$

Сталу інтегрування C_1 знаходимо, врахувавши початкові умови

$t = 0 \Rightarrow x(0) = 0$ - початкове зміщення x відсутнє. Тоді:

$$x(t) = \frac{1}{c}(P_0 - gm_1 - gm_2 - K_{tr} + a_1 t)(1 - e^{-\frac{ct}{\mu}}) \tag{7}$$

Після диференціювання рівняння (7) отримаємо швидкість руху штока запобіжного клапана

$$\frac{d}{dt}x(t) = \frac{1}{\mu}e^{-\frac{ct}{\mu}}(gm_1 + gm_2 + K_{tr} + \frac{a_1\mu}{c} - P_0) - \frac{a_1}{c} \tag{8}$$

У разі, коли тиск у посудині зростає практично миттєво і стає $P_{кр}$, тоді розв'язок диференціального рівняння руху штока запобіжного клапана ($P(t)=P_{кр}$) буде:

$$x(t) = \frac{p_{кр} - K_{tr} + e^{\left(-\frac{ct}{\mu}\right)}(gm_1 + gm_2 + K_{tr}) - (m_1 + m_2)g}{c} \tag{9}$$

Виконавши диференціювання рівняння (9) знайдемо швидкість реагування (спрацьовування) запобіжного клапана

$$\frac{d}{dt}x(t) = \frac{e^{\left(-\frac{ct}{\mu}\right)}(gm_1 + gm_2 + K_{tr} - P_{кр})}{\mu} \tag{10}$$

Враховуючи, що $P_{кр}$ значно більше ніж P_0 і коефіцієнт c значно більше одиниці розрахункова швидкість реагування запобіжного клапана визначене з рівняння (10) значно менше ніж за рівняння (8). Це можна привести до вибуху та руйнуванню конструкції.

У реальних умовах експлуатації технологічного обладнання маємо умови, коли у відповідності з технологічним регламентом тиск у ємності різний, що призводить до того, що шток запобіжного клапана має початкове x_0.

Тоді розв'язок рівняння (4) для $P(t)=P_{кр}$ буде

$$x(t) = e^{\left(-\frac{ct}{\mu}\right)}\left(x_0 + \frac{gm_1 + gm_2 + K_{tr} - P_{кр}}{c}\right) - \frac{gm_1 + gm_2 + K_{tr} - P_{кр}}{c} \tag{11}$$

Виконавши диференціювання рівняння (11) отримаємо швидкість руху штока запобіжного клапана

$$\frac{d}{dt}x(t) = -\frac{e^{\left(-\frac{ct}{\mu}\right)}(x_0 c - P_{кр} + gm_1 + gm_2 + K_{tr})}{\mu} \qquad (12)$$

Рівняння (11), (12) необхідні для автоматизованого контролю тиску у системах з запобіжними клапанами.

Отримані рівняння дають можливість розрахувати зміщення x штока захисного клапана, швидкість зміщення, час спрацьовування захисного пристрою. Вони свідчать, що істотним недоліком запобіжних клапанів є їх інерційність, тобто потрібно якийсь час, щоб клапан прийшов у дію. Запобіжні клапани розраховані головним чином на поступове підвищення тиску в апараті, у граничному випадку — миттєвого підвищення тиску, посудини й апарати обладнають спеціальними захисними пристроями — запобіжними (розривними) мембранами, що руйнуються при підвищенні тиску тим самим запобігають вибуху і руйнуванню апарата.

З численних прикладів застосування запобіжних мембран для захисту технологічного устаткування можна виділити наступні:

запобіжні мембрани в якості самостійних запобіжних пристроїв (при швидкому наростанні тиску);

одночасна установка запобіжних клапанів і мембран (клапан спрацьовує при звичайному досить повільному підвищенні тиску, мембрана, будучи допоміжним або додатковим пристроєм, спрацьовує в аварійній ситуації при швидкому підвищенні тиску);

установка мембран перед запобіжними клапанами (захист деталей клапанів від корозії, підвищення герметичності);

установка мембран у сполученні з іншими пристроями (вибухові люки, вогнеогороджувачі, відсікачі, гідрозатвори і т.д.).

Конструкції мембранних запобіжних пристроїв виготовляють з різних матеріалів: чавун, скло, графіт, сталь, алюміній, бронза і багато інших. Вибір типу і матеріалу мембрани залежить від умов експлуатації посудин і апаратів, на яких вони встановлені: тиску, температури, фазового стану й агресивності середовища, швидкості наростання тиску, часу скидання надлишкового тиску й інших факторів. Основним є забезпечення достатньої пропускної здатності

мембранного пристрою, коли в посудині, тиск досягає максимально припустимого значення. Мембрана при цьому повинна зруйнуватися і звільнити прохідний перетин для випуску середовища зі швидкістю, не меншої швидкості збільшення тиску в апараті.

Для забезпечення запобіжної здатності мембрани потрібно визначити товщину пластин мембрани встановити зв'язок з тиском, що руйнує її. Розрахунок пропускної здатності мембранних запобіжних пристроїв у випадку поступового підвищення тиску (кг/с):

$$Q = 220Sp\sqrt{M/T}, \tag{13}$$

де S — робочий (прохідний) перетин, см^2; p — абсолютний тиск перед запобіжним пристроєм, 10^{-1}МПа; M - молекулярна маса газів або парів, що проходять через пристрій; T— абсолютна температура газів або пар, К.

Необхідна товщина ламкої робочої частини мембрани, мм:

$$b = p_1 dk / 4[\sigma_p], \tag{14}$$

де p_1 - тиск, при якому повинна зруйнуватися пластинка, Па; d-робочий діаметр пластини, см; k - масштабний коефіцієнт, визначається досвідченим шляхом (k = 0,32 для відношення d/b = = 10...15); $[\sigma_p]$ - межа міцності на зріз, Па.

Мембрани з тендітних матеріалів:

$$b = 0.11r\sqrt{p/[\sigma_{из}]}, \tag{15}$$

де r — радіус пластини, мм; $[\sigma_{из}]$ — межа міцності на вигин, Па.

Виготовлені з однорідного матеріалу мембрани піддають, вибірковому іспитові, за результатами якого визначають них, придатність.

У випадку скидання токсичних і вибухонебезпечних продуктів клапани, мембрани й інші захисні пристрої обладнають спеціальними відводами для викидів газів і парів в атмосферу або в аварійні ємності.

Критичне навантаження $R_{кр}$, при якому відбувається руйнування мембрани розраховують з рівняння кінетики його зростання (рис.2)

$$R_{кр} = \frac{dP}{dt} t_{кр} \tag{16}$$

Зусилля, яке виникає під дією тиску у ємності може змінюватись за законом

$P_1(t) = P_0 + at$ - прямо пропорційна залежність (лінійна залежність)

$P_2(t) = P_0 + ae^{\alpha t}$ - за законом експоненти (нелінійна залежність)

$P_3(t) = P_0 + at^b$ - степенева залежність (нелінійна залежність)

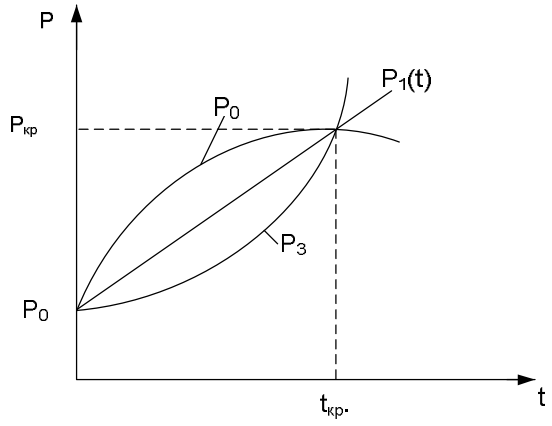

Рис. 2. Критичні криві зміни зусилля руйнування мембрани

Врахувавши можливий вид кривої зростання зусилля знайдемо тривалість $t_{кр}$, коли відбудеться руйнування мембрани

$$P_1(t) = P_0 + at \Rightarrow \frac{dP_1}{dt} = a \Rightarrow t_{кр} = \frac{P_{кр}}{a} \tag{17}$$

$$P_2(t) = P_0 + ae^{\alpha t} \Rightarrow \frac{dP_2}{dt} = a\alpha e^{\alpha t} \Rightarrow t_{кр} = \frac{P_{кр}e^{-\alpha t}}{a\alpha} \tag{18}$$

$$P_3(t) = P_0 + at^b \Rightarrow t_{кр} = \frac{dP_3}{dt} = abt^{b-1} \Rightarrow t_{kp} = \frac{P_{kp}t^{1-b}}{ab} \tag{19}$$

Висновки. Аналіз проведеної роботи та розрахунків дають можливість розрахувати час спрацьовування мембранного захисного пристрою, визначити інерційність конструкції, і тим самим підібрати необхідну за розмірами і формою мембрану. Для визначення цих параметрів доцільно виконувати розрахунки при умовах, які забезпечують опимальні параметри роботи захисних пристроїв. Використані в роботі комп'ютерні методи розрахунку дозволяють це зробити більш ефективно.

ЛІТЕРАТУРА

1. Бойко А.В., Гаркуша А.В.. Аэродинамика проточной части паровых и газовых турбин: расчеты, исследования, оптимизация, проектирование / Академия наук высшей школы Украины. — Х., 1999. — 359с.

2. Водоподготовка и водный режим котельных: Сборник рекомендаций по эксплуатации водоподготовительного оборудования и ведению воднохимического режима отопительных котельных / Государственный учебный центр "Профессионал" / М.Ф. Парменова (подгот.). — М., 2000. — 76 с.

3. Голосков Д.П. Уравнения математической физики .СПб.: Питер.2004 – 539с.

4. Гладышев Г.П., Дорожков А.А., Лебедев В.В., Тихомиров А.А. Безопасная эксплуатация паровых и водогрейных котлов. — М. : Энергоатомиздат, 1995. — 241с.

5. Журкин В. Г., Грингауз А. М. Пособие для изучающих правила устройства и безопасной эксплуатации паровых и водогрейных котлов в вопросах и ответах. — М. : НПО ОБТ, 2001.

6. Правила будови і безпечної експлуатації парових та водогрійних котлів (зі змінами та доповненнями): ДНАОП 0.00-1.08-94 / Комітет по нагляду за охороною праці України. — К. : Основи, 1999. — 592с.

7. Пчелинцев В.А., Коптев Д.В., Орлов Г.Г. Охрана труда в строительстве. М: Высшая школа, 1991- 272 с.

Надійшла до редколегії 23.09.2010 р.